

О ВОЗМОЖНОЙ ПРИРОДЕ КВАНТОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Выдвигается гипотеза, объясняющая квантовую нелокальность в экспериментах с фотонами (ЭПР, с отложенным выбором и т.п.) тем, что в лабораторной системе отсчета (ЛСО) время движения фотона конечно, тогда как длительность его т.н. *собственного* времени движения (в вакууме) равно нулю. В последнем случае в качестве одновременных могут рассматриваться события, разделенные в ЛСО произвольными конечными расстояниями; таким образом, свойство нелокальной корреляции фотонов оказывается относительным и может быть объяснено аналогично известному парадоксу близнецов в теории относительности. Сформулированы аргументы в пользу обобщения основной гипотезы на квантовые частицы, обладающие ненулевой массой.

Ключевые слова: теория относительности, нелокальность, квантовая механика, корреляция, парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена, сверхсветовая скорость, релятивистская причинность, система отсчета, запутанное состояние.

PACS: 03.65.Ud

1. Введение

С 1935 года в современной физике обсуждается проблема нелокальной связи между парой изначально взаимодействовавших, но затем взаимно удаленных на произвольное расстояние квантовых частиц [Einstein et al., 1935]; Шрёдингер назвал [Schrödinger, 1935, 1936] это явление запутыванием (entanglement). Оно характеризуется тем, что до момента измерения состояние обоих ЭПР-партнеров не определено (оно представляет собой суперпозицию возможных состояний), а при измерении (и в зависимости от конфигурации этого измерения) состояния партнеров оказываются *мгновенно* коррелированными независимо от разделяющего их расстояния. Данный факт подтвержден многочисленными экспериментами, начиная с работ группы Аспе (см. [Aspect, 2002]). Вкратце рассмотрим простейшую схему ЭПР-эксперимента (рис. 1).

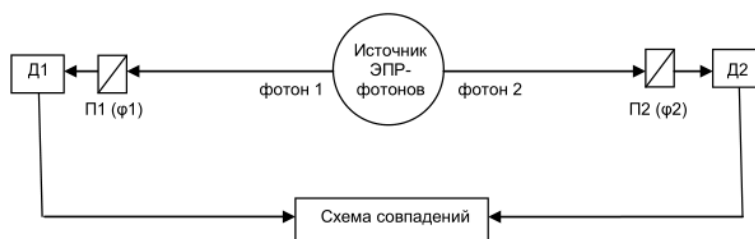


Рисунок 1. Схема «статического» ЭПР-эксперимента

Когда в этом эксперименте *измеряется* (с помощью поляризатора П и детектора Д) поляризация одного из двух запутанных фотонов, тем самым *мгновенно* предопределяется результат измерения поляризации другого фотона. Статистика совпадений зависит *только* от разности $(\varphi_1 - \varphi_2)$ и выявляется схемой совпадения отсчетов детекторов Д1 и Д2.

Чтобы убедиться в мгновенности процесса коррелирования, схема «статического» эксперимента усложняется до «динамической» версии (рис. 2).



Рисунок 2. Схема “динамического” ЭПР-эксперимента

В таком эксперименте углы ориентации поляризаторов Π случайным образом с помощью коммутаторов $K1$ и $K2$ изменяются ($\varphi_1 \leftrightarrow \varphi_1'$, $\varphi_2 \leftrightarrow \varphi_2'$) через интервалы времени, малые по сравнению с L/c , где L – расстояние между поляризаторами, c – скорость света, поэтому детектируемое событие с одной стороны и соответствующее изменение ориентации поляризаторов с другой стороны разделены пространственно-подобным интервалом. Все равно результаты измерений (статистика) зависят только от *мгновенного* значения разности углов.

В работе [Salart et al., 2008] приводится описание ЭПР-эксперимента, выполненного в Швейцарии. Там источник посылал пары фотонов из Женевы на две приемные станции через оптоволоконную сеть. Станции расположены в двух населенных пунктах в окрестностях Женевы, на расстоянии 8.2 и 10.7 км, соответственно. Прямое расстояние между ними равно 18.0 км. На каждой приемной станции фотоны проходили через идентичные несбалансированные интерферометры Майкельсона и регистрировались детектором одиночных фотонов. Реальное “загадочное действие на расстоянии” (по выражению Эйнштейна) требовало бы сверхсветового влияния. В указанной работе оцениваются экспериментальные границы скорости всех таких гипотетических воздействий. Был осуществлен эксперимент по проверке неравенств Белла продолжительностью более чем 24 часа между двумя населенными пунктами, удаленными один от другого на 18 км примерно по оси восток-запад, источник фотонов был расположен примерно посередине. Непрерывно наблюдалась двухфотонная интерференция, заведомо превышавшая порог для неравенства Белла. Конфигурация эксперимента позволила определить нижнюю границу скорости этого “загадочного влияния”, которая превышает скорость света, по крайней мере, на 4 порядка амплитуды.

В определенной степени факт такой мгновенной (нелокальной) корреляции представляется противоречащим теории относительности, согласно которой перенос энергии и информации между разделенными пространственноподобным интервалом системами невозможен – это так называемое требование бессигнальности (non-signaling). Автор знаменитой теоремы Белла писал: “*Эти корреляции прямо-таки вопиют об объяснении, а мы не можем его дать!*” [Bell, 1990]. Ниже делается попытка объяснить возникновение таких корреляций на основе учета свойств фотона в теории относительности. Для ЭПР-опытов с фотонами это оправдано их предельно возможной скоростью распространения, что выводит ситуацию за пределы *внутренней* области светового конуса.

2. “Галактический” парадокс Уилера

Уилер предложил [Wheeler, 1984] такой мысленный эксперимент (рис.3). Пусть удаленный квазар испускает фотон, миллиарды лет летящий к Земле. По дороге этот фотон огибает огромную галактику, которая и является причиной искривления пути

фотона. В конечном счете свет попадает на вход установленного на Земле телескопа, снабженного интерферометром Маха-Цендера.

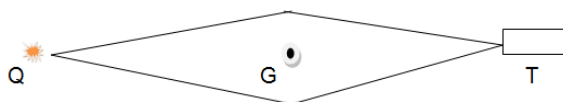


Рисунок 3. Свет от удаленного квазара Q огибает массивную галактику G и попадает на вход установленного на Земле телескопа T, снабженного интерферометром Маха-Цендера.

На входе телескопа помещают интерферометр, в который можно ввести (или не ввести) 50% светоделитель, в результате чего будет (или не будет) наблюдаться интерференция¹. В первом случае нет способа выяснить, по какому именно пути прошел фотон огибая галактику, т.е. он поведет себя как волна; во втором случае информация о выборе фотоном одной из возможных траекторий не пропадает, и он поведет себя как частица. Суть парадокса состоит в том, что выбор между волновым и корпускулярным поведением осуществляется в самое *последнее мгновение*, когда фотон *уже пролетел* отведенные ему миллиарды лет путешествия [Wheeler, 1984]. Этот эффект также можно рассматривать как проявление нелокальности - как может излучаемый фотон заранее знать, будет ли введен светоделитель?

3. Парадокс Тетроде и концепция прямого межчастичного взаимодействия

В широко известной статье [Wheeler and Feynman, 1945] цитируется замечательная по глубине мысль Хьюго Тетроде² [Tetrode, 1922]:

Солнце не излучало бы, если бы где-либо не нашлось тела, способного поглотить это излучение ... Например, если я вчера наблюдал с помощью телескопа звезду, удаленную, скажем, на 100 световых лет, то не только я знаю, что испущенный ею 100 лет назад свет достиг моего глаза, но также и звезда или ее отдельные атомы уже 100 лет назад знали, что я, который даже еще не существовал тогда, вчера вечером увижу этот свет в такое-то время.

Но как удаленная звезда может “знать”, где и когда в будущем будет зарегистрирован испущенный ею фотон? С нашей точки зрения, это яркий пример проявления нелокальности, очень близкий к вышеописанному “галактическому” парадоксу Уилера.

Авторы статьи [Wheeler and Feynman, 1945], стремясь обосновать тезис Тетроде, предложили схему “мгновенного” (прямого межчастичного) взаимодействия электронов со всеми возможными будущими поглотителями испускаемого ими излучения. Эта идея, в частности, позволяет легко вывести т.н. “радиационное затухание” излучателя, но при этом использует довольно сложные представления о комбинации опережающих и запаздывающих волн (см., например, [Владимиров и Турыгин, 1986]). С нашей точки зрения можно рассматривать прямое межчастичное взаимодействие (дальнодействие) как одно из проявлений эффекта нелокальности.

¹ Вводимый светоделитель играет роль “квантового ластика”, т.к. после его прохождения фотоном принципиально нет возможности определить путь, который фотон проделал до этого.

² Хьюго Мартин Тетроде (1895 – 1931) – голландский физик, работавший в области статистической физики и квантовой теории.

4. Сокращение времен и расстояний в теории относительности

Обратим внимание, что Уилер анализирует ситуацию исключительно в ЛСО. Однако эту ситуацию можно проанализировать и в движущейся системе отсчета. Предположим сначала, что от квазара или звезды до Земли летит не фотон, а ракета, скорость которой меньше скорости света. Пусть при наблюдении этого путешествия с Земли, т.е. в *лабораторной* системе отсчета, оно длится, скажем, 1 миллиард лет. Но в *сопутствующей* системе отсчета, связанной с ракетой, собственное время путешествия и пройденное расстояние уменьшается, как известно, в $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ раз, где v - скорость ракеты, c - скорость света. Чем быстрее летит ракета, тем сильнее эффект сокращения, однако причинно-следственная связь событий сохраняется: старт ракеты всегда *предшествует* финишу.

Но что будет, если вместо ракеты или любого объекта, движущегося с досветовой скоростью, рассмотреть фотон, летящий со скоростью света?

С одной стороны, с фотоном, *строго говоря*, нельзя связать никакую сопутствующую систему отсчета. Однако можно говорить о том (по этому поводу разногласий нет), что случай фотона является предельным, и в этом пределе (так сказать, “с точки зрения фотона”) собственное время движения фотона и собственное пройденное им расстояние станут равны нулю, а старт и финиш окажутся *одновременными* и разделенными *нулевым* пространственным расстоянием.

Поэтому момент старта фотона, покидающего квазар, и момент финиша, когда он проходит или (не проходит) через светоделитель на входе телескопа – это *один и тот же момент* его собственного времени. И с формально-логической точки зрения нет никакого противоречия в утверждении, что фотон выбрал, вести ли ему себя как частица или как волна, ровно в *тот же момент времени*, в который наличие или отсутствие светоделителя в телескопе заставило его сделать этот выбор. В рамках теории относительности – с помощью косвенных аргументов – мы видим, что подобный парадокс возможен (моменты излучения и поглощения фотона совпадают в его *собственном* времени), если не неизбежен, и притом ровно в той же степени, что и парадокс близнецов.

Мы уверены, что здесь мы сталкиваемся фактически с тем же самым парадоксом. С одной стороны (как было отмечено выше), как, не входя в противоречие с современными физическими представлениями, удаленная звезда может “знать”, где и когда в будущем будет зарегистрирован испущенный ею фотон? С другой стороны, мысль о том, что фотон – всего лишь звено строго согласованного взаимодействия между двумя (хотя бы и взаимно удаленными) атомами, оказывается чрезвычайно соблазнительной и получает свое красивое объяснение. Нам представляется, что и “мгновенность” (в собственном времени) такого взаимодействия фотона вполне сочетается с точкой зрения *лабораторного* наблюдателя, что фотон вылетел в случайном направлении и через некоторое *конечное* время столкнулся со случайным поглотителем, хотя эта сочетаемость и кажется на первый взгляд парадоксальной.

5. Переосмысление причинно-следственных отношений

Таким образом, в отличие от ситуации с ракетой, для *фотона* (с его “точки зрения”) причинно-следственные отношения между событиями старта и финиша утрачивают смысл, становясь отношениями между *одновременными* событиями: ни одно из них не предшествует другому и не является следствием другого. Поместим теперь наблюдателя в начало системы координат Минковского и рассмотрим произвольное другое 4- событие.

- Если это другое 4-событие расположено *внутри* светового конуса, то 4-мерный интервал между этими событиями оказывается *действительным*.
- Если это другое 4-событие *на самом* световом конусе, то 4-мерный интервал

между этими событиями оказывается *равным нулю*.

- Если это другое 4-событие расположено *вне* светового конуса, то 4мерный интервал между этими событиями оказывается *мнимым*.

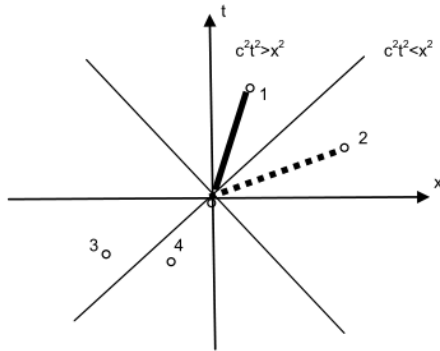


Рисунок 4

События 1 и 4 *могут* быть связаны с началом координат причинно-следственным взаимодействием, т.е. между ними может *однаправлено* передаваться информация и/или энергия (апериодический процесс).

События 2 и 3 *не могут* быть связаны с началом координат причинно-следственным взаимодействием, т.е. между ними, как обычно принято считать, *не может* *однаправлено* передаваться информация и/или энергия. Но *взаимовлияние* может поддерживаться *строго периодическим* процессом. В этом мы видим решение конфликта между КМ и ТО.

В статье [Белинский и Шульман, 2016] мы указывали, что переход от причинно-следственного взаимодействия между событиями внутри светового конуса (временеподобный 4-интервал) к некоторому взаимовлиянию между событиями, разделенными световым конусом (пространственноподобный 4-интервал) может описываться переходом от апериодических процессов к *строго периодическим* процессам. При таком переходе исчезает *направленная* во времени передача информация и/или энергии взаимодействия, хотя среднеквадратичное значение этой энергии оказывается больше нуля, т.е. взаимовлияние двух событий имеет место, хотя ни одно из них не может быть ни причиной, ни следствием другого. При переходе через световой барьер (в частности, при падении в черную дыру) и возникают квантовые корреляции по обе стороны такого барьера [Leonhardt, 2010].

Выше мы рассматривали парадокс Уилера в лабораторной системе отсчета, в которой время движения между стартом и финишем было действительным. Однако *собственное* время движения фотона равно нулю. Поэтому момент старта фотона, покидающего квазар, и момент финиша, когда он проходит или (не проходит) через светоделитель на входе телескопа - это *один и тот же момент* его собственного времени. И формально нет никакого противоречия в утверждении, что фотон “выбрал” - вести ли ему себя как частица или как волна - ровно в *тот же момент времени*, в который наличие или отсутствие светоделителя в телескопе заставило его сделать этот выбор. Согласно теории относительности подобный парадокс не только возможен, но и необходим.

То же можно сказать и о парадоксе Тетроде. Фотон - всего лишь звено строго согласованного взаимодействия между двумя (хотя бы и взаимно удаленными) атомами. “Мгновенность” (в *собственном* времени) такого взаимодействия фотона вполне сочетается с точкой зрения *лабораторного* наблюдателя, что фотон вылетел в случайном направлении и через некоторое *конечное* время столкнулся со случайным поглотителем, хотя эта сочетаемость и кажется на первый взгляд парадоксальной.

6. “Отложенный” выбор поведения фотонов

В вышеописанной ситуации с фотоном проявилась идея Уилера об “отложенном выборе” - когда (в *лабораторной* системе отсчета) решение о той или иной конфигурации измерения принимается на заключительной (а не начальной) стадии процесса распространения фотона, или даже еще позже. В двух экспериментальных реализациях (Вена, 2007 и Канарские острова, 2008 - [Ma et al., 2013]) источник запутанных фотонных

ЭПР-пар испускал пару фотонов (“системный фотон” и “фотон среды”). Системный фотон распространялся через интерферометр в одну сторону, а фотон среды являлся объектом поляризационных измерений с другой стороны от источника. Выбор вида измерения, позволяющий либо задать информацию о выборе пути (“а” или “б”), либо получить интерференционную картину для системных фотонов, делались в условиях локальности по Эйнштейну, т.е. причинная связь (в лабораторной системе отсчета) между системным фотоном и фотоном среды заведомо отсутствовала.

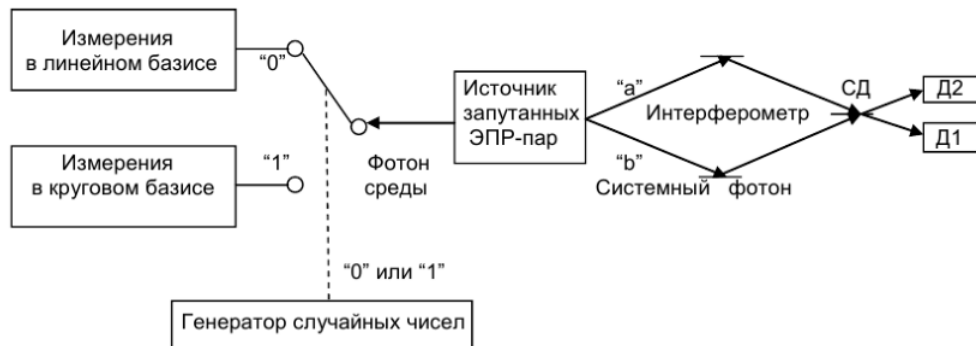


Рисунок 5

Целью этого эксперимента являлась манипуляция типом поведения системного фотона с помощью измерительного воздействия на фотон среды. При измерении фотона среды в линейном базисе выявляется информация о выборе пути системным фотоном, при этом интерференция системного фотона наблюдаться не может (корпускулярное поведение); при измерении фотона среды в круговом базисе информация о выборе пути стирается, возникает интерференция системного фотона, которая зависит от сдвига фаз в плечах “а” и “б” (волновое поведение).

Если путь системного фотона (справа) до детектора *длиннее*, чем путь фотона среды (слева) до коммутатора, то парадокса нет – событие манипуляции фотоном среды происходит *раньше*, чем на выходе интерферометра возникает или не возникает интерференционная картина, т.е. причина предшествует следствию. Однако в том случае, когда путь системного фотона (справа) до детектора делается *короче*, чем путь фотона среды (слева) до коммутатора, то в лабораторной системе отсчета возникает, как принято считать, парадокс – событие манипуляции фотоном среды происходит *позже*, чем на выходе интерферометра возникает или не возникает интерференционная картина, т.е. теперь причина наступает позже следствия! В указанной работе этот парадокс экспериментально подтвержден.

Для прояснения происходящего рассмотрим известный парадокс близнецов в специально адаптированной версии для двух фотонов. Пусть у нас имеется источник S (запутанной) пары фотонов и два идеальных оптоволоконных кабеля, имеющих в общем случае две различные длины L_1 и L_2 , концы которых расположены достаточно близко между собой в точке D (регистратор фотонов). Для определенности будем считать $L_2 > L_1$.

Рассмотрим ситуацию в лабораторной системе отсчета. Пусть пара фотонов генерируется в момент $T_0 = 0$. Первый фотон достигнет детектора D в момент времени $T_1 = L_1/c$, а второй фотон достигнет детектора D в момент времени $T_2 = L_2/c$, где c - скорость света. Соответственно разность этих времен ΔT в лабораторной системе отсчета составит

$$\Delta T = (L_2 - L_1)/c.$$

При этом по *собственному* времени для *каждого* из фотонов все путешествие является мгновенным, разность времен путешествия для них $\Delta T' = 0$. Т.е. если бы у

фотонов были свои часы, и они были бы синхронизированы в момент излучения пары, то разность между их показаниями в момент прибытия была бы также равна нулю.

Поэтому, с нашей точки зрения, парадокс устраняется так же, как и в предыдущем случае. Вся логика авторов эксперимента (как и в ЭПР- экспериментах) основывается на анализе в *лабораторной* системе отсчета; если же рассмотреть события, используя *собственное* время фотонов, то промежуток времени (и расстояние) между измерениями над системным фотоном и фотоном среды будет стремиться к *нулю*, поэтому никакой рассогласованности в том, что с ними происходит, просто не может быть. Выходной бит генератора случайных чисел в этот момент времени (и в собственном времени фотона) связан с воздействием на фотон среды ровно таким сигналом, какой и должен быть, поэтому вся триада оказывается скоррелированной.

7. О распространении гипотезы на частицы с ненулевой массой

Если для фотонов относительность феномена нелокальности кажется довольно убедительной, то на первый взгляд кажется, что в случае квантовых частиц с ненулевой массой покоя дело обстоит иначе. Впрочем, в некоторых опытах, в которых речь идет об отложенном выборе, казалось бы, не для фотонов, а для спинов электронов (см., например, [Hensen et al., 2015], где участвуют электроны в двух лабораториях, разнесенных на 1280 м), при анализе выясняется, что на первой же стадии эксперимента взаимно удаленные спины электронов запутываются (с помощью процедуры свопинга) с *фотонами*, которые и являются реальными акторами эксперимента, так что предложенное нами объяснение оказывается применимым и в этом случае. Однако в ЭПР-опыте с запутанными *электронами* последние разлетаются с досветовыми скоростями, так что прямое объяснение такого рода не подходит.



Рисунок 6

Рассматривая две взаимно удаляющиеся запутанные между собой частицы с *ненулевой* массой покоя, у одной из которых измеряется координата, а у другой импульс, следует иметь в виду, что сколь угодно точное измерение обеих величин при сохранении взаимной корреляции противоречило бы соотношению неопределенностей Гейзенберга в *лабораторной* системе отсчета. Это рассуждение верно, если частицы мыслятся идеальными “механическими шариками”. Но в реальности квантовые частицы *нельзя* считать механическими шариками, между которыми не существует никакой связи (см. рис. 6).

Массивные квантовые частицы (в частности, электроны) обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Так, для электрона Дираком в 1928 г. было получено релятивистское описание волновой функции в виде системы четырех дифференциальных уравнений для четырех спинорных величин, где одна пара отвечает положительной, а вторая пара - отрицательной энергии электрона, и в каждой паре одна из величин отвечает одному направлению спина, а другая - противоположному. При этом операторы для составляющих скорости электрона не коммутируют между собой, а собственные значения каждого из них в результате измерения обязательно должны быть равны по абсолютной величине скорости света. Такой парадоксальный результат Шрёдингер в 1930 году объяснил [Schrödinger, 1930] наличием у электрона двух

компонент скорости – обычной (медленной) и быстро осциллирующей с частотой, отвечающей периоду волны де Бройля для электрона³.

Аналогичные представления о безмассовых “zig” и “zag” компонентах реального электрона описаны в книге [Penrose, 2004]:

Дираковский спинор с его четырьмя комплексными компонентами можно представить в виде пары 2-спиноров <...>. Тогда уравнение Дирака можно записать в виде уравнения, связывающего эти два 2-спинора, при этом каждый из них играет в отношении другого роль «источника» с «константой связи» $M/\sqrt{2}$ (где M – масса частицы), определяющей «силу взаимодействия» между ними... Форма этих уравнений показывает, что дираковский электрон можно считать состоящим из двух ингредиентов <...>. Им можно придать некоторый физический смысл. Можно представить себе картину, в которой существуют две «частицы», <...>, причем обе они не имеют массы, и каждая из них непрерывно превращается в другую. Дадим этим частицам имена «zig» и «zag», так что одна будет описывать частицу «zig», а другая — частицу «zag». Будучи безмассовыми, они должны перемещаться со скоростью света, однако вместо этого можно считать, что они «качаются» взад-вперед, причем движение вперед частицы «zig» непрерывно превращается в движение назад частицы «zag», и наоборот. Фактически это есть реализация явления, называемого «zitterbewegung» («дрожание») и состоящего в том, что мгновенное движение электрона из-за участия в таких колебаниях всегда происходит со скоростью света, хотя полное усредненное движение электрона характеризуется скоростью, меньшей скорости света. Каждый из указанных ингредиентов имеет спин величиной $\hbar/2$ в направлении движения, соответствующий левому вращению в случае частицы «zig» и правому для частицы «zag». <...> Заметим, что хотя скорость все время меняется, направление спина в системе покоя электрона остается постоянным. <...> При такой интерпретации частица «zig» выступает как источник для частицы «zag», а частица «zag» — как источник в отношении частицы «zig», сила связи между ними определяется величиной M . Рассматривая процесс в целом, мы обнаружим, что средняя частота, с которой это происходит, связана обратным соотношением с параметром связи — массой M ; фактически это есть «де-бройлевская частота» электрона.

Наконец, в работе [Вонсовский и Свирский, 1972] еще более ясно сформулировано, что “дрожательному” движению соответствует представление стационарного состояния электрона в виде суперпозиции двух собственных состояний оператора скорости с собственными значениями $+c$ и $-c$. В итоге “эффективная” скорость электрона равна

$$v_z = c^2 \frac{p_z}{E} + \frac{i\hbar c \dot{v}_{z0}}{2E} \exp(-2iEt/\hbar) = (v_z)_{\text{средн}} + (v_z)_{\text{осц}}$$

здесь p_z – проекция импульса, E – энергия частицы, \dot{v}_{z0} – значение \dot{v}_z при $t=0$. Именно среднее значение скорости $(v_z)_{\text{средн}}$ определяется значением реально измеряемого импульса p_z частицы. Направления средней скорости и импульса совпадают только в стационарных состояниях с положительной энергией, тогда как в состояниях с отрицательной энергией они антипараллельны.

³ Шрёдингер писал также по этому поводу [Schrödinger, 1930]: “Квадрат каждой компоненты скорости может, следовательно, принимать только значение c^2 , причем наряду с этим он должен в таком случае являться также средним значением (математическим ожиданием) для многих измерений на одном и том же волновом пакете. Сама компонента скорости допускает лишь значения $\pm c$. Ее математическое ожидание может быть и в общем будет меньшим. Тем не менее, для него ожидают порядок величины c и удивляются, как это может удаваться центру тяжести облака заряда двигаться всегда так быстро и все же при известных условиях перемещаться поступательно только с умеренной скоростью. Это, очевидно, возможно потому, что он не движется прямолинейно.”

Таким образом, рассматривая, скажем, спины запутанных между собой электронов, мы обязательно сталкиваемся с нетривиальным волновым (колебательным) процессом, в котором взаимодействие компонент (не связанное с реально наблюдаемым движением электронов) осуществляется со скоростью света. Но тогда есть основания полагать, что описанные выше аргументы в пользу относительной (а не абсолютной) нелокальности экспериментов с фотонами могут быть справедливыми и для квантовых частиц, обладающих массой. Возникает, с одной стороны, “мгновенное” взаимовлияние между граничными точками области движения, а с другой стороны – “*эффе́ктивное*” движение частиц с *досветовой средней скоростью*. Фактически это приводит к концепции волны-пилота де Бройля-Бома и, соответственно, к возможности количественного описания результатов в полном соответствии с законами квантовой механики.

8. Концепция де Бройля – Бома

В 1923 Луи де Бройль опубликовал [Broglie, 1923] гипотезу о том, что частицы с ненулевой массой покоя (например, электроны), как и фотоны, обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. При этом движение частицы управляется некоей волной-пилотом. В 1952 г. Дэвид Бом, развивая его идеи, опубликовал две связанные общей концепцией статьи [Bohm, 1952], где предложил перейти от *одного* уравнения Шрёдингера для *комплекснозначной* волновой функции $\Psi = \sqrt{\rho} \exp(iS/\hbar)$ с внешним потенциалом V :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \Psi$$

к системе двух связанных уравнений для двух *действительных* величин – квадрата модуля амплитуды ρ и фазы S волновой функции:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \frac{\nabla S}{m} \right) = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V + Q = 0.$$

Здесь

$$Q \equiv \frac{\hbar^2}{4m} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\nabla \rho}{\rho} \right)^2 - \frac{\nabla^2 \rho}{\rho} \right]$$

есть так называемый *квантовый потенциал*. Первое уравнение представляет собой уравнение непрерывности для плотности вероятности ρ . Второе уравнение вместе с квантовым потенциалом описывают эволюцию поля фазы, управляющей движением квантовых частиц.

Фаза в уравнении Бома оказывается *нелокальным* параметром, ее динамика зависит от специфического квантового потенциала который, в свою очередь, зависит исключительно от *неравномерности* плотности распределения в пространстве. Наличие квантового потенциала отличает квантовое описание от классического, где *никакого аналога этому члену нет*. Квантовый потенциал обеспечивает в общем случае так называемую *запутанность* между частицами, т.е. тот факт, что отдельные траектории (которые в бомовской интерпретации имеют физический смысл) не независимы одна от другой и не описываются отдельными независимыми волновыми функциями.

Бом утверждал, что фазу следует рассматривать как “скрытый параметр” в смысле фон Неймана. Джон Белл объяснил допустимость этого скрытого параметра – в противоречии с утверждением фон Неймана – тем, что фаза волновой функции *нелокальна*. Однако Леггет показал [Legget, 2003], что и нелокальные теории скрытых

параметров ограничены неравенствами, которые нарушаются квантово-механическими предсказаниями.

С нашей точки зрения, справедливость концепции де Бройля-Бома теоретически вытекает как раз из предложенной нами модели, в которой, “с точки зрения фотона (или любой распространяющейся со скоростью света компоненты)”, проблема нелокальности просто отсутствует.

Между тем, специалисты, работающие в рамках этого подхода, получили ряд глубоких, важных и весьма общих результатов, рассчитав картины дифракции и интерференции для множества как стандартных, так и нетривиальных конфигураций, в частности – для задач физической химии

Например, в публикации [Gondran and Gondran, 2013] а) представлены результаты численного моделирования для двухщелевого эксперимента с электронами, б) приводится аналитическое выражение для волновой функции в опыте Штерна – Герлаха, в) исследуется версия Бома эксперимента Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПРБ-эксперимент). Его теоретическое решение в пространстве и времени показывает, что когда каждый атом обладает координатой и спином, то существует причинная интерпретация. Ниже приводятся краткие результаты, полученные авторами цитируемой работы.

а) Моделирование двухщелевого эксперимента

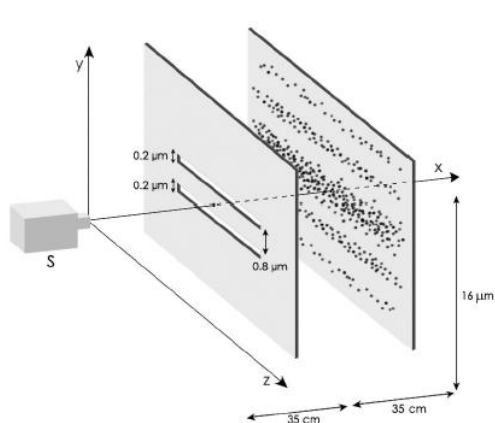
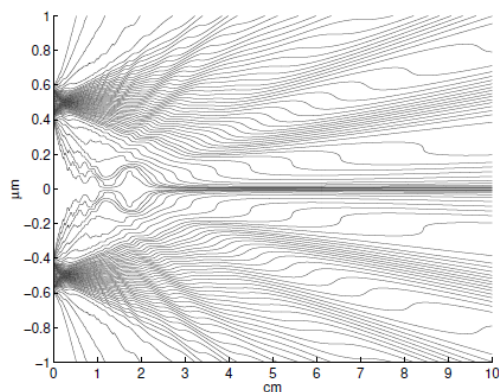


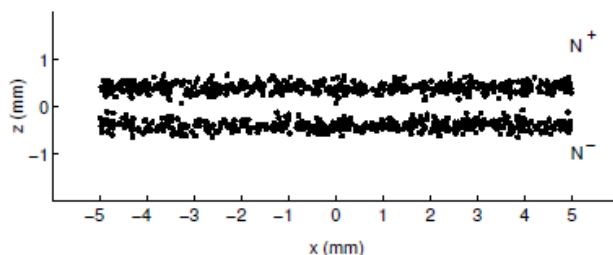
Диаграмма двухщелевого эксперимента с электронами.



Расчетные траектории 100 электронов

б) Моделирование опыта Штерна-Герлаха

Исторически эксперимент Штерна-Герлаха был первым, который помог установить квантование спина. Учитывая пространственное разложение на две компоненты спина, авторы цитируемой работы сумели объяснить декогеренцию и продемонстрировать три постулата измерения: квантование, статистическую интерпретацию Борна и редукцию волновой функции.



Расчетные следы 1000 атомов серебра на детекторе.

в) Физическое объяснение нелокальности в ЭПРБ-эксперименте

Из волновой функции двух запутанных частиц авторы цитируемой статьи находят спины, траектории, а также волновую функцию каждой из двух частиц. В такой интерпретации квантовая частица имеет локальное положение подобно классической частице, но она обладает также нелокальным поведением, возникающим из волновой функции. Таким образом, именно волновая функция порождает неклассические свойства. Мы можем сохранить точку зрения на частицу, исходя из представлений о локальном реалистическом мире, но мы должны добавить нелокальное видение с помощью волновой функции. Нелокальные влияния в ЭПРБ-эксперименте распространяются только на ориентацию спина, но не на движение частиц как таковое. Действительно, в волновой функции запутанными являются только спины, но не положения или перемещения. Это ключевая точка в поиске физического объяснения нелокальных влияний.

г) Концепция де Бройля – Бома и волновые процессы

Концепция де Бройля – Бома может быть применена не только к частицам с ненулевой массой, но и в физике электромагнитного излучения, физике других волновых процессов (например, акустических). Так, в [Sanz, 2012] было рассмотрено прохождение светового импульса по волноводу. Предполагая, что электромагнитное поле, проходящее сквозь волновод, является гармоническим, оно может быть аппроксимировано плоской волной, модулированной некоторой комплекснозначной амплитудой $\Psi(r) = |\Psi(r)| \exp(ik_z z)$, где $k_z = n_0 k$, $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны в вакууме, и n_0 – индекс преломления среды. После подстановки этого выражения в уравнение Гельмгольца и пренебрежения наивысшим порядком производной по z это уравнение, как можно показать, оказывается в действительности изоморфным уравнению Шрёдингера, причем параметр $k_z = n_0 k$ играет роль “оптической массы”.

9. Заключение

Итак, мы исходим из простого утверждения: когда осуществляется некоторый опыт, рассматриваемый в различных системах отсчета, и существенно различным течением времени в этих системах отсчета пренебрегать нельзя, то следует исходить из того, что совпадение результатов для одних и тех же 4-мерных событий должно иметь *объективный* характер, хотя при этом могут возникать кажущиеся парадоксальными ситуации, а некоторые свойства (в частности – нелокальность) могут оказаться относительными.

Например, в парадоксе близнецов и возраст Землянина, и возраст Космонавта сравниваются в одних и тех же – начальной и финальной – 4-мерных точках пространства-времени, при этом в каждой системе отсчета этот возраст вычисляется строго по правилам теории относительности; таким образом, в соответствии с теорией, парадокс должен проявляться и действительно проявляется.

С нашей точки зрения, точно такая же ситуация имеет место и в квантовых экспериментах с нелокальной (в ЛСО) корреляцией между фотонами. Сопоставление результатов, полученных в разных системах отсчета, но сопоставимых по отношению к начальным и финальным условиям, приводит к кажущимся парадоксам, которые, тем не менее, неизбежны и отражают различие свойств объектов в разных системах отсчета. Вероятно, “мгновенностью” взаимодействия с “точки зрения фотона” объясняется и сам факт влияния принципиального наличия *информации* о выборе пути на результат измерения: эта информация возникает ровно в тот же момент времени, когда и осуществляется результат.

Что же касается запутанных пар квантовых частиц, обладающих массой и распространяющихся с досветовой скоростью, то мы рассмотрели косвенные аргументы в пользу справедливости предложенной гипотезы и в этом случае. Те же аргументы должны

быть справедливы в общем случае и для экспериментов с телепортацией, хотя стоит отметить, что там “переносчиками” запутанности обычно служат именно фотоны.

Ссылки:

- [**Aspect, 2002**] A. Aspect. Bell's theorem: the naive view of an experimentalist. The text prepared for a talk at a conference in memory of John Bell, held in Vienna in December 2000. It has been published in “Quantum [Un]speakables – From Bell to Quantum information”, edited by R. A. Bertlmann and A. Zeilinger, Springer (2002). <http://arXiv.org/abs/quant-ph/0402001>.
- [**Bell, 1990**] J.S. Bell. Indeterminism and nonlocality (the talk presented on 22 January 1990 at CERN on invitation of the Center for Quantum Philosophy, Geneva). <http://www.quantumphil.org/Bell-indeterminism-and-nonlocality.pdf>.
- [**Bohm, 1952**] D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. I, Phys. Rev. 85, 166-179(1952); A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “hidden” variables. II, Phys. Rev. 85, 180-193 (1952)]
- [**Broglie, 1923**] Lois de Broglie. Compt. Rend. , 1923, v. 179, p. 507 – 548.
- [**Gondran and Gondran, 2013**] Michel Gondran, Alexandre Gondran. Measurement in the de Broglie-Bohm interpretation: Double-slit, Stern-Gerlach and EPRB. <https://arxiv.org/pdf/1309.4757v1.pdf>
- [**Dirac, 1928**] P. A. M. Dirac. The Quantum Theory of the Electron. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **117** (778), (1928). <http://www.math.ucsd.edu/~nwallach/Dirac1928.pdf>.
- [**Einstein et al., 1935**] A.Einstein, B.Podolsky, and N.Rosen, Phys. Rev. 47, p. 777, 1935.
- [**Hensen et al., 2015**] B. Hensen et al., 2015. Experimental loophole-free violation of a Bell inequality using entangled electron spins separated by 1.3 km. <http://arxiv.org/pdf/1508.05949v1.pdf>.
- [**Leggett, 2003**] A. J. Leggett. Nonlocal Hidden-Variable Theories and Quantum. Mechanics: An Incompatibility Theorem. Foundations of Physics, vol. 33, № 10, October 2003.
- [**Leonhardt, 2010**] Leonhardt U. Essential quantum optics. From quantum measurements to black holes, Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 301 p.
- [**Ma et al., 2013**] X. Ma et al. Quantum erasure with causality disconnected choice. <https://arxiv.org/pdf/1206.6578v2.pdf>
- [**Salart et al., 2008**] D. Salart, A. Baas, C. Branciard, N. Gisin, and H. Zbinden. Testing spooky action at a distance. arXiv:0808.3316v1 [quant-ph] 25 Aug 2008.
- [**Sanz, 2012**] Ángel S. Sanz. Quantumness beyond quantum mechanics. <https://arxiv.org/pdf/1202.5181.pdf>
- [**Penrose, 2004**] R. Penrose. The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. USA, Alfred A. Knopf, 2004, 1136 pp. Русский пер.: Р. Пенроуз. Путь к реальности, или законы, управляющие Вселенной. Полный путеводитель. Москва-Ижевск, РХД, 2007. 910 с.
- [**Schrödinger, 1930**] E. Schrödinger. Über die kräftefreie Bewegung in der relativistischen Quantenmechanik («On the free movement in relativistic quantum mechanics»), Berliner Ber., pp. 418—428 (1930); Zur Quantendynamik des Elektrons, Berliner Ber, pp. 63-72 (1931). Русский пер.: Э. Шрёдингер. О свободном движении в релятивистской квантовой механике. В сб. “Эрвин Шрёдингер. Избранные труды по квантовой механике.” М.: Наука, 1976, с.с. 218-228.
- [**Schrödinger, 1935**] E. Schrödinger. Discussion of probability relations between separated systems. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society **31** (4): 555–563 (1935).
- [**Schrödinger, 1936**] E. Schrödinger. Probability relations between separated systems. Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society **32** (3): 446–452 (1936).

- [**Tetrode, 1922**] Tetrode. Zeits. f. Physik 10, 317 (1922).
- [**Wheeler, 1984**] J.A. Wheeler, 1984, in Quantum Theory and Measurement, ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek (Princeton University Press).
- [**Wheeler and Feynman, 1945**] J.A. Wheeler, R.P. Feynman. Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation, Reviews of Modern Physics, **17**, 156, (1945).
- [**Белинский и Шульман, 2016**] А.В. Белинский, М.Х. Шульман. Квантовые корреляции и сверхсветовое взаимодействие // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия, 2016, вып. 4. С. 29 – 38.
- [**Владимиров и Турыгин, 1986**] Ю.С. Владимиров, Ф.Ю. Турыгин. Теория прямого межчастичного взаимодействия. М.: “Энергоатомиздат”. 1986. 136 с.
- [**Вонсовский и Свирский, 1972**] С.В. Вонсовский, М.С. Свирский. // Проблемы теоретической физики. Сб. памяти И.Е. Тамма. М.: Наука, 1972. С. 389